

Influência na qualidade final de metais retificados através da variação da velocidade de mergulho

(Variable feed-rate influence on the final quality of metal grinding)

Manoel Cleber Sampaio Alves

Prof. Dr., UNESP-Faculdade de Eng. Industrial Madeireira, Itapeva-SP, Brasil. E-mail: manoel@itapeva.unesp.br

Eduardo Carlos Bianchi

Prof. Titular, UNESP - Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru-SP, Brasil. E-mail: bianchi@feb.unesp.br

Paulo Roberto de Aguiar

Prof. Dr., UNESP - Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru-SP, Brasil. E-mail: aguiarpr@feb.unesp.br

Rodrigo Eduardo Catai

Prof. Dr., UFTPR - Univ. Federal Tecnológica do Paraná, Curitiba-PA, Brasil. E-mail: catai@bol.com.br

Resumo

A retificação, processo final de usinagem de uma peça, utiliza fluidos de corte com a finalidade de lubrificação, refrigeração e remoção de cavacos. No entanto, esses fluidos são extremamente agressivos com o meio. Com o avanço tecnológico a tendência mundial é produzir peças cada vez mais sofisticadas, com elevado grau de tolerância geométrica, dimensional, com bom acabamento superficial, com baixo custo e, principalmente, sem causar danos ao meio. Para tanto, ao processo de retificação está intrínseca a reciclagem do fluido de corte, que se destaca pelo seu custo. Através da variação da velocidade de avanço no processo de retificação cilíndrica externa do aço ABNT D6, racionalizando a aplicação de dois fluidos de corte e usando um rebolo superabrasivo de CBN (nitreto de boro cúbico) com ligante vitrificado, avaliaram-se os parâmetros de saída da força tangencial de corte, emissão acústica, rugosidade, circularidade, desgaste da ferramenta, tensão residual e a integridade superficial através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos corpos-de-prova. Com a análise do desempenho do fluido, do rebolo e da velocidade de mergulho, encontraram-se as melhores condições de usinagem propiciando a diminuição do volume de fluido de corte e a diminuição do tempo de usinagem, sem prejudicar os parâmetros geométricos e dimensionais, o acabamento superficial e a integridade superficial dos componentes.

Palavras-chave: ABNT D6, retificação, velocidade de mergulho, rugosidade, circularidade; fluidos de corte, mínima quantidade de lubrificação, integridade superficial.

Abstract

Grinding, the final stage of the machining process, employs a significant amount of cutting fluids for lubrication, cooling and swarf removal. However, these cutting fluids are extremely aggressive to the environment. With technological progress, the world tendency is to produce more and more sophisticated pieces, having a high degree of geometrical and dimensional tolerance, good surface finish, low cost and, mainly, insignificant impact on the environment. Therefore, recycling cutting fluids is intrinsic and cost-cutting for the grinding process and This work aimed to assess several output parameters in external cylindrical grinding: tangential force, acoustic emission, surface roughness, roundness, tool wear, and residual stress. Also, analysis of microstructural features through Scanning Electron Microscopy (SEM) was carried out. Tests was developed for ABNT D6 steel, using a CBN grinding wheel with vitrified bond and two types of cutting fluids Analyzing cutting fluid performance, grinding wheel time and feed rate, the best grinding conditions were found, leading to a decrease in cutting fluid volume and grinding time without impairing the geometrical and dimensional parameters, surface finish and surface integrity of the parts.

Keywords: ABNT D6, grinding, feed rate, roughness, surface roundness, machining, cutting fluid, minimum quantity of lubrication, surface integrity.

1. Introdução

A retificação é conhecida como um dos mais complexos processos de usinagem devido ao grande número de variáveis englobadas. Tal processo confere à peça o acabamento final, minimizando as rugosidades e irregularidades superficiais.

Diversos processos de usinagem convencional utilizam fluidos de corte como meio de lubrificação e refrigeração da peça produzida. A tendência mundial é produzir peças cada vez mais sofisticadas, com elevado grau de tolerância geométrica, dimensional e acabamento superficial, com baixo custo e sem poluir o meio ambiente. Assim, os fluidos de corte que normalmente também são utilizados em operações de retificação foram muitas vezes dispostos no meio ambiente, fato que não condiz com a situação atual, levando-se em consideração o rigor das leis, da fiscalização e de um novo conceito em produzir através da adoção do “selo verde”. O mesmo indica se os processos utilizados para a produção de uma determinada peça não prejudicam o meio ambiente. Dessa forma, a utilização em massa dos fluidos de corte tende a diminuir com o passar do tempo, tornando-se necessárias pesquisas a respeito de tal assunto, visando à diminuição da participação de tais fluidos nos processos produtivos e, conseqüentemente, no meio ambiente, sem alterar a qualidade do componente usinado.

São enormes os benefícios fornecidos pelos fluidos de corte no setor industrial, porém o armazenamento dos mesmos é feito de forma não satisfatória. Assim elevadas quantidades de fluido de corte são utilizadas nas indústrias de maneira incorreta. Como exemplo dessa utilização indevida, em muitas indústrias, ocorre grande dispersão de fluido no momento da usinagem, gerando, dessa forma, grandes perdas. A lubrificação e a refrigeração dependem da efetiva entrada de fluido na região de corte entre a peça e a ferramenta, não havendo a necessidade de volumes elevados, considerando que parte deste não esteja penetrando na região de corte efetivamente (Webster, 1995).

As dificuldades em se realizar a correta manutenção, o descarte e os problemas ambientais relacionados aos fluidos de corte presentes nos processos de usinagem têm gerado uma tendência mundial, que é o emprego de uma quantidade racional do fluido de corte no processo através de técnicas otimizadas em sua aplicação.

Nesse trabalho, verificaram-se, na retificação cilíndrica externa de mergulho, a influência da velocidade de mergulho, o desempenho do rebolo de CBN e as influências de diferentes fluidos de corte, usando a lubri-refrigeração otimizada. Analisaram-se a rugosidade superficial, desvio de circularidade, desgaste diametral do rebolo, força tangencial de corte, emissão acústica, tensão residual e realizaram-se análises microestruturais.

2. Metodologia

Nesse trabalho, empregou-se uma metodologia de ensaios utilizando uma retificadora cilíndrica modelo RUAP 515H do fabricante SULMECÂNICA equipada com um comando numérico CNC da Fagor. Utilizou-se a retificação cilíndrica externa de mergulho. Como parâmetros de entrada, utilizou-se a variação da velocidade de mergulho “ v_f ” (cinco valores proporcionando grandezas distintas de taxa de remoção de material) e também foram utilizados dois fluidos de corte distintos.

Como ferramenta, foi utilizado um rebolo superabrasivo de CBN (Nitreto de Boro Cúbico) 876-L360N3, fabricado com ligante vitrificado, com diâmetro externo de 350mm, largura de 20mm e espessura de 5mm. Esse tipo de rebolo (rebolo superabrasivo) possibilita ganhos significativos de produtividade e qualidade. As operações de dressagem da ferramenta abrasiva foram mantidas constantes para todos os ensaios. Para tanto, utilizou-se um dressador do tipo conglomerado com dimensões 15x8x10. Nessa operação, a retirada de material do rebolo foi de aproximadamente 100mm, ou até que a ferramenta abrasiva não apresentasse nenhuma marca referente à usinagem.

Os corpos-de-prova foram fabricados com o aço ABNT D6 (AISI/SAE D6, GERDAU D6, DINW.NR 1,2436, X210CrW12, VC 131,) e foram temperados e revenidos, obtendo-se dureza média de 62 HRC.

Utilizaram-se como fluidos de corte o óleo emulsionável de base vegetal (a base de ésteres sintéticos), com especificação DMS 3200 F-1, com concentração de 3,5% e com pH mantido em 9,0, e o fluido sintético, com a especificação AGECOOL 939/B, com concentração de 5% e pH em 9,0.

Foi utilizado um bocal circular conforme Webster (1995) com saída circular de Ø4mm, para distribuir o fluido de corte a uma velocidade aproximadamente igual à velocidade periférica do rebolo (V_s). Tal velocidade é necessária para que o fluido de corte vença a barreira de ar gerada pela alta rotação do rebolo e penetre na região de contato entre ferramenta e peça sem perda de velocidade e pressão (Webster, 1999), agindo de forma favorável à refrigeração do processo.

Variáveis de saída analisadas:

- Rugosidade: a obtenção da rugosidade média aritmética (R_a) foi realizada através de um rugosímetro portátil modelo Subtronic 3+ da marca Taylor Hobson. O rugosímetro era ajustado para efetuar a medição com um comprimento de amostragem $l_c = 4\text{mm}$ e cut-off = 0,8mm e foi posicionado de uma forma que a medição fosse executada no sentido axial da peça.
- Força tangencial de corte: a força tangencial de corte (F_{tc}) foi obtida através do monitoramento da potência elétrica (P_c) consumida pelo motor de acionamento do eixo árvore do rebolo, conseguida através da obtenção dos valores de tensão e da corrente elétrica proveniente desse motor elétrico.
- Desgaste radial do rebolo: o desgaste radial do rebolo foi obtido através da marcação do perfil desgastado do rebolo em um tarugo confeccionado em aço ABNT 1045 e medido com um aparelho TESA digital, modelo TT60, com precisão de 0,1 μm .

- Emissão acústica: o nível de emissão acústica foi captado com um sensor piezoelétrico de emissão acústica conectado a uma unidade de tratamento de sinais da marca SENSIS modelo DM42.
- Tensão residual: para a obtenção da tensão residual foi utilizado um Difratômetro de Raios X Siemens Modelo D5000, através do método de múltipla exposição (determinação da distância interplanar para vários ângulos de inclinação da amostra). Análise dos dados obtidos foi realizada mediante o uso do software S2003 (R.M/2003).
- Desvio de circularidade: a medição do desvio de circularidade foi realizada em uma máquina modelo Talyround 31C marca Taylor Hobson.
- Integridade superficial: feita através de um Microscópio Eletrônico de Varredura Leica, modelo Stereoscan 440. A utilização da microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi feita para verificar os possíveis danos causados à superfície do material através de solições térmicas e mecânicas.

Os parâmetros de corte utilizados foram: velocidade de corte, $V_s=30\text{m/s}$, penetração do rebolo na peça, $a=0,1\text{mm}$, tempo de spark-out, $t_s=8\text{s}$, velocidade

periférica da peça, $V_w=1,24\text{m/s}$, diâmetro da peça, $d_w=62\text{mm}$, largura de retificação, $b=3\text{mm}$, velocidade do jato de fluido de corte, $V_j=30\text{m/s}$, vazão de fluido de corte de $22,6\text{L/min}$, bocal circular com $\varnothing 4\text{mm}$ (refrigeração otimizada). Foram realizados 100 ciclos de usinagem para cada ensaio.

Os ensaios foram divididos em grupos de três, indicando a repetibilidade para cada velocidade de mergulho. Desta forma, obtiveram-se os dados apresentados na Tabela 1.

3. Resultados e discussões

Nesse capítulo, são apresentados os resultados obtidos através da análise das variáveis de saída: força tangencial de corte, rugosidade superficial, tensão residual, desgaste radial do rebolo, emissão acústica, desvio de circularidade e análise da integridade superficial das peças retificadas.

3.1 Resultados referentes à força tangencial de corte

As Figuras 1a e 1b apresentam os resultados de força tangencial média de

corte para ensaios realizados com óleo solúvel de base vegetal e emulsão, respectivamente, para as cinco velocidades de mergulho usadas.

Percebe-se que o comportamento da força para ambos os fluidos é igual, uma vez que a menor força de corte foi conseguida com velocidade de mergulho de $0,25\text{mm/min}$.

Fazendo uma análise global entre todos os gráficos, percebe-se que os maiores valores de força de corte foram conseguidos com a velocidade de mergulho igual a $1,5\text{mm/min}$, no caso do uso do óleo solúvel vegetal como fluido de corte, e velocidade de mergulho de $1,00\text{mm/min}$, no caso do uso da emulsão como fluido de corte.

Já os menores valores de força de corte foram conseguidos com a velocidade de mergulho igual a $0,25\text{mm/min}$, para o óleo solúvel de base vegetal, e a $0,50\text{mm/min}$ para a emulsão.

Nota-se, que nos primeiros ciclos de todas as condições, ocorrem maiores valores para a força de corte, que, ao longo dos ciclos, vai decrescendo, devido à renovação das arestas de corte e à capacidade de auto-afiação do rebolo.

A força tangencial de corte está diretamente relacionada com a rugosidade superficial final da peça. Essa variável

Tabela 1 - Forma de realização dos ensaios.

| Ensaio | Fluido de Corte | Velocidade de Mergulho (V_f) (mm/min) |
|---------|--|---|
| 1 a 3 | Óleo solúvel de base vegetal DMS 3200 F1 | 2,00 |
| 4 a 6 | Óleo solúvel de base vegetal DMS 3200 F1 | 1,50 |
| 7 a 9 | Óleo solúvel de base vegetal DMS 3200 F1 | 1,00 |
| 10 a 12 | Óleo solúvel de base vegetal DMS 3200 F1 | 0,50 |
| 13 a 15 | Óleo solúvel de base vegetal DMS 3200 F1 | 0,25 |
| 16 a 18 | Emulsão Agecool 939/B | 2,00 |
| 19 a 21 | Emulsão Agecool 939/B | 1,50 |
| 22 a 24 | Emulsão Agecool 939/B | 1,00 |
| 25 a 27 | Emulsão Agecool 939/B | 0,50 |
| 28 a 30 | Emulsão Agecool 939/B | 0,25 |

permite também analisar o desempenho das ferramentas abrasivas como a capacidade de fixação dos grãos abrasivos pelo ligante e a ocorrência de macro e microdesgaste, entre outros parâmetros.

3.2 Resultados da emissão acústica

A Figura 2a apresenta a emissão acústica média para ensaios realizados com óleo solúvel de base vegetal. A Figura 2b apresenta a emissão acústica média para ensaios realizados com a emulsão.

Analisando a Figura 2a, referente à utilização do óleo solúvel de base vegetal, percebe-se que, para as velocidades de mergulho de 0,50mm/min e 0,25mm/min, os valores de emissão acústica são praticamente os mesmos, e são os menores valores obtidos. Já as velocidades de mergulho de 1,5mm/min e 1,00mm/min apresentam valores próximos de emissão acústica e são os maiores valores obtidos.

Observa-se, na Figura 2b, que as velocidades de mergulho de 1,50mm/min e 1,00mm/min novamente apresentaram valores de emissão acústica próximas, tais valores se apresentaram como os me-

nores valores até praticamente a metade do ciclo de usinagem. A velocidade de mergulho de 0,25mm/min foi a que apresentou maior valor de emissão acústica durante todo o ciclo.

3.3 Resultados de rugosidade

A Figura 3 apresenta os resultados de rugosidade média para ensaios realizados com óleo solúvel de base vegetal e emulsão para as cinco velocidades de mergulho utilizadas. Para cada ensaio, foram efetuadas três medidas na superfície, possibilitando, desse modo, a determinação da média dos valores.

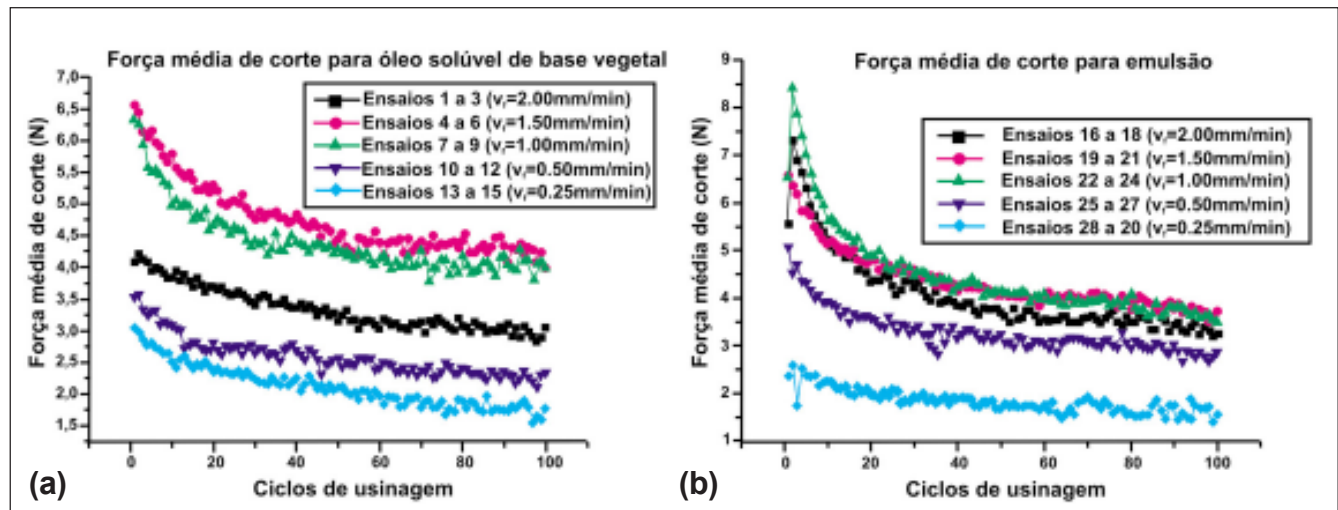


Figura 1 - Força tangencial média de corte para ensaios realizados com óleo solúvel de base vegetal (a) e emulsão (b) para as cinco velocidades de mergulho usadas.

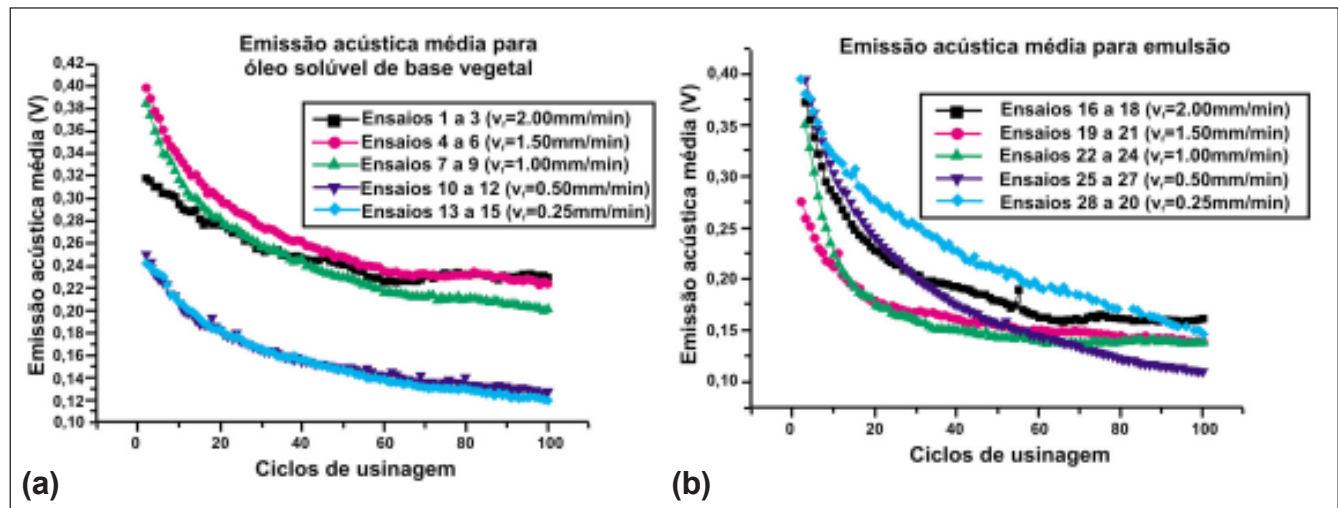


Figura 2 - Emissão acústica média para ensaios realizados com óleo solúvel de base vegetal (a) e com emulsão (b) para as cinco velocidades de mergulho utilizadas.

Observam-se, também, maiores rugosidades para maiores velocidades de mergulho e menores rugosidades para ensaios com óleo solúvel.

Para Hara (1999), o efeito da rugosidade poderia ser totalmente anulado pelo fato de os ensaios terem envolvido regiões de “spark out” ou centelhamento de 8 segundos, ou seja, nenhum comportamento característico seria observado, fato esse não comprovado.

3.4 Resultados de desgaste radial do rebolo

Na Figura 4, pode-se observar os desgastes radiais médios do rebolo para os ensaios realizados com óleo solúvel de base vegetal e emulsão para as diferentes velocidades de mergulho.

A análise da Figura 4 indica que o desgaste do rebolo é maior para a velocidade de mergulho de 0,25mm/min, enquanto que a velocidade de mergulho de 2,00mm/min apresenta o menor desgaste do rebolo. O desgaste diametral do rebolo é um forte indicativo para avaliação entre diferentes condições de retificação. Menor desgaste da ferramenta significa maior vida útil da ferramenta e, portanto, deve-se optar por maiores velocidades de mergulho na faixa testada para uma maior vida da ferramenta, devido ao alto custo dos rebolos de CBN.

3.5. Desvio de circularidade

A Figura 5 apresenta os resultados para o desvio de circularidade para o uso de óleo solúvel de base vegetal e emulsão, respectivamente, para as cinco velocidades de mergulho empregadas.

Para a emulsão, a velocidade de avanço de 2,00mm/min foi a que apresentou as melhores condições de usinagem, uma vez que esta foi a que apresentou o menor valor de desvio de circularidade. Percebe-se que, para as maiores velocidades de avanço, a emulsão apresentou os melhores resultados, enquanto que, para as menores velocidades de

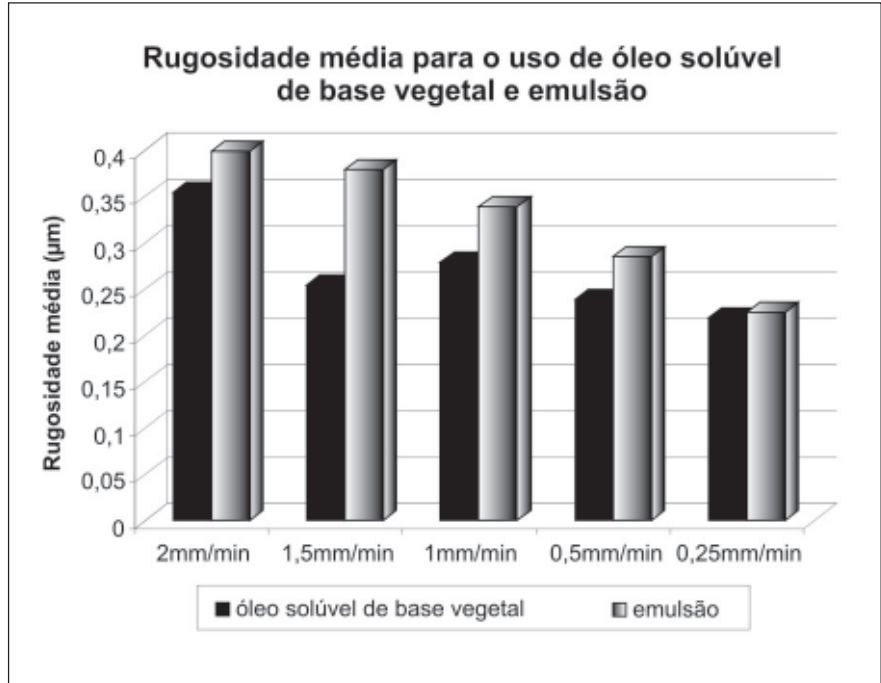


Figura 3 - Rugosidade média para ensaios realizados com óleo solúvel de base vegetal e emulsão para as cinco velocidades de mergulho utilizadas.

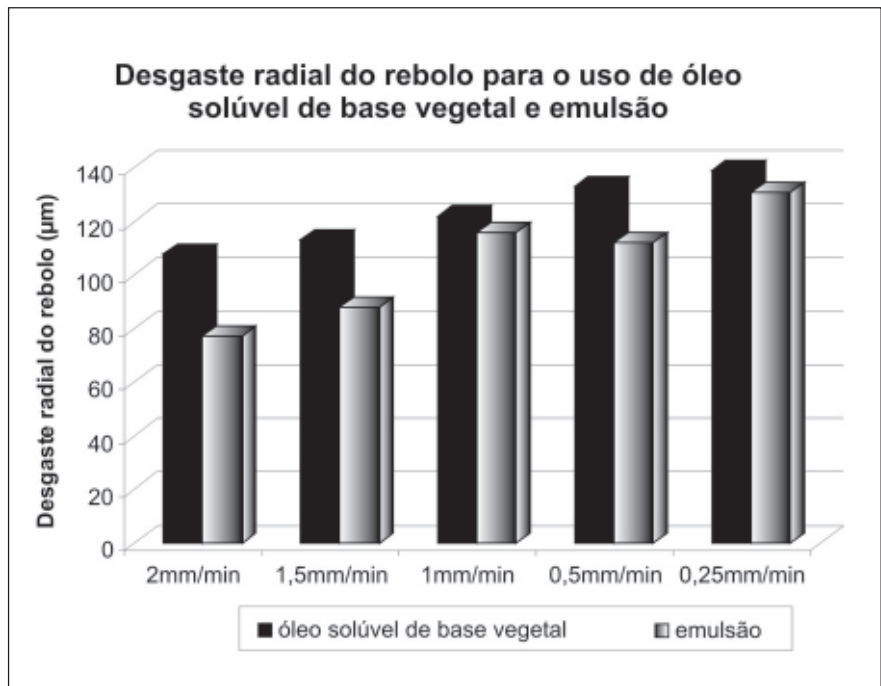


Figura 4 - Comparação dos desgastes radiais do rebolo.

avanço, foi o óleo vegetal que apresentou as melhores condições. Pode-se perceber, também, que, ao fazer a média dos valores de circularidade para os fluidos, encontraram-se valores de 3,51µm, para

o óleo solúvel de base vegetal, e um valor de 4,54µm, para a emulsão, sendo mais viável a utilização do óleo solúvel de base vegetal para a usinagem, nas condições propostas.

3.6. Resultados referentes à tensão residual

A Figura 6 apresenta os resultados da tensão residual para o uso de óleo solúvel de base vegetal e emulsão para as 5 velocidades de mergulho empregadas.

Os valores de tensões residuais de compressão gerados com a refrigeração otimizada indicam que o jato de fluido penetrou de maneira eficiente na região de corte, proporcionando uma boa lubrificação, reduzindo o atrito peça/rebolo e contribuindo para a manutenção da afiação do rebolo.

Nota-se que as condições testadas resultaram em valores de tensão residual de compressão, sendo tais condições benéficas às propriedades mecânicas do material, proporcionando, assim, uma melhoria na integridade superficial.

Observa-se que o óleo solúvel de base vegetal foi o fluido que apresentou os melhores resultados com os maiores valores de tensão de compressão.

O rebolo de CBN, que apresenta alta condutibilidade térmica dos grãos, é muito menos sensível às variações na quantidade de material removido, garantindo tensões residuais de compressão, mesmo após longos períodos de retificação (Brinksmeier, 1986).

3.7 Resultados referentes à integridade superficial através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As micrografias realizadas nos corpos-de-prova para todas as diferentes condições de usinagem se apresentaram idênticas e sem alterações microestruturais. Duas micrografias são apresentadas na Figura 7.

Pode-se afirmar que não ocorreram diferenças nas microestruturas, quando da variação da velocidade de avanço e do tipo de fluido de corte, pois as condições de corte empregadas não foram tão

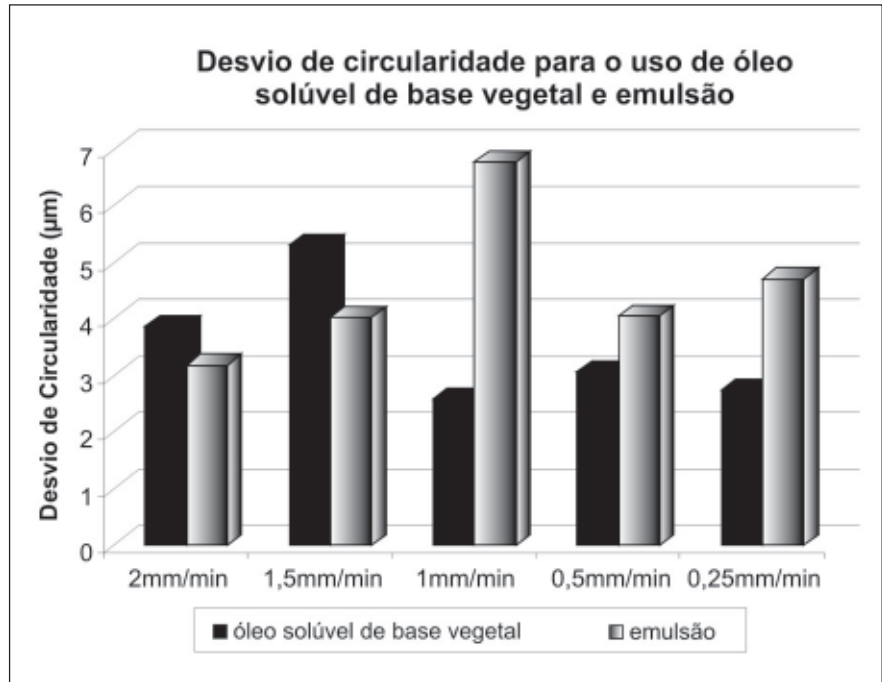


Figura 5 - Desvio de circularidade para o uso de óleo solúvel de base vegetal e emulsão para as cinco velocidades de mergulho empregadas.

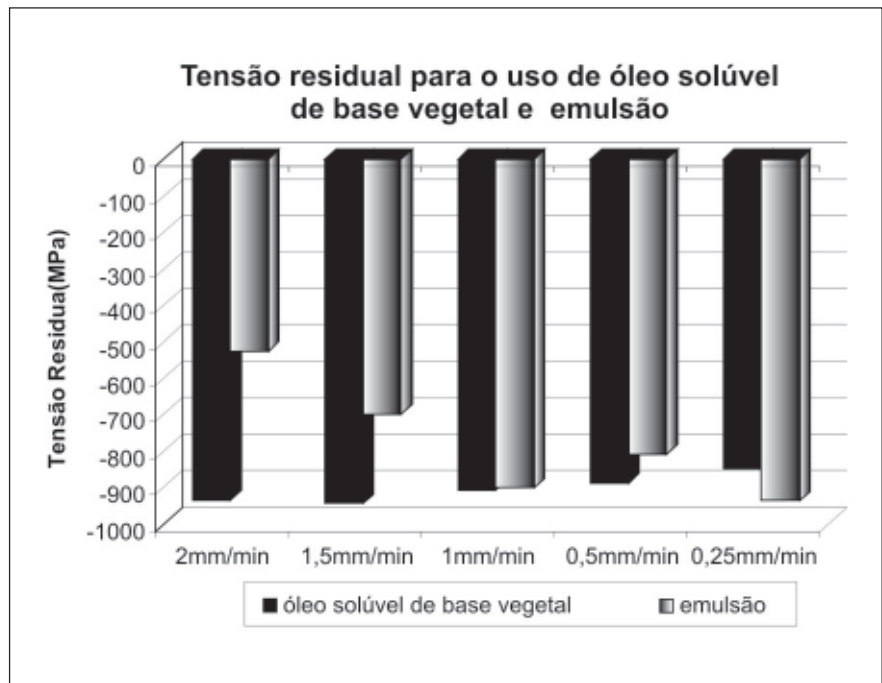


Figura 6 - Tensão de compressão para o uso de óleo solúvel de base vegetal e emulsão para as 5 velocidades de mergulho empregadas.

agressivas que pudessem alterar a microestrutura do aço ABNT D6 temperado e revenido. Provavelmente a quantidade de calor gerada no processo absorvida pela peça durante o processo de

retificação não foi suficiente para produzir alterações subsuperficiais, mostrando que a refrigeração, através da otimização da aplicação de fluido, foi eficiente.

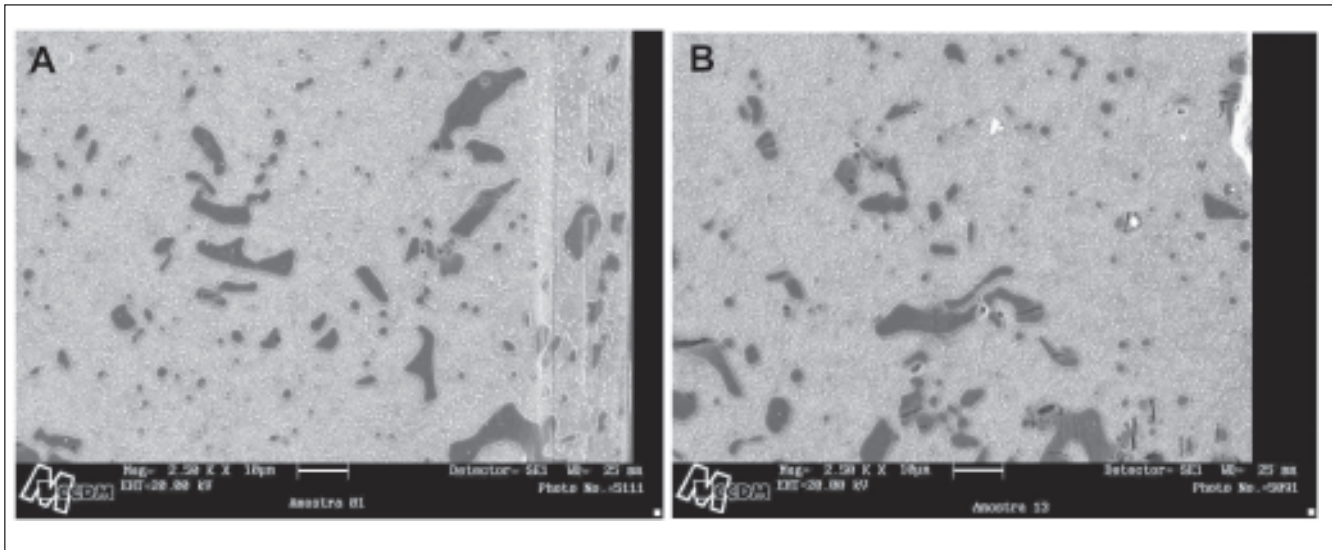


Figura 7 - Microscopia eletrônica de varredura para ensaio realizado com óleo solúvel de base vegetal, com velocidade de mergulho de 2,00mm/min (a) e velocidade de mergulho de 0,25mm/min (b).

4. Conclusões

Através dessa pesquisa, pode-se observar o comportamento da retificação cilíndrica de mergulho utilizando-se rebolo superabrasivo de CBN com ligante vitrificado para variadas velocidades de avanço. Pode-se concluir que:

- Para os menores valores de velocidade de mergulho, correspondentes a 0,50mm/min e 0,25mm/min, os maiores valores de emissão acústica encontrados foram referentes à utilização da emulsão como fluido de corte.
- Com relação à velocidade de avanço do rebolo, os valores obtidos, para o desvio de circularidade, foram próximos, mas a velocidade de 1,00mm/min é a que obteve o melhor resultado.
- A análise das microscopias apresentou resultados semelhantes para todas as velocidades e tipos de fluido de corte utilizados não apresentando danos superficiais.
- Considerando os resultados obtidos com a rugosidade, emissão acústica e desgaste da ferramenta e os resultados obtidos de tensão residual, desvio de circularidade e MEV, pode-se afirmar que os melhores resultados obtidos foram com o óleo solúvel de base vegetal e a velocidade de mergulho de 2,00mm/min.

- Comparativamente o óleo solúvel de base vegetal apresentou os menores valores de força de corte, os menores desgastes radiais do rebolo, bem como os melhores resultados para a tensão residual, pois esse óleo proporciona, comparativamente com a emulsão, a menor taxa de resfriamento, o maior poder lubrificante, o que reduz o atrito e a geração de calor na zona de retificação.
- Quanto aos valores das rugosidades obtidas, constatou-se que há variações que demonstram um comportamento relacionado à taxa de avanço (velocidade de mergulho), ou seja, há uma rugosidade maior para maiores taxas de avanço.

5. Agradecimentos

Agradecimentos especiais à FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo auxílio à pesquisa concedido e à Universidade Estadual Paulista UNESP - Campus de Bauru - por ceder o Laboratório de Usinagem por Abrasão para o desenvolvimento desse programa.

6. Referências bibliográficas

- BRINKSMEIER, E. A model for the development of residual stresses in grinding. *Niku-Lari, a Advances in Surface Treatments*. (5ª ed.). Pergamon Press, v. 5, p. 173-189, 1986.
- HARA, C. M. *Uma contribuição para o monitoramento de retificação cilíndrica de mergulho*. Campinas: UNICAMP, 1999. (Tese de Doutorado).
- WEBSTER, J. Optimizing coolant application systems for high productivity grinding. *Abrasives Magazine*, October/November, 1999.
- WEBSTER, J., CUI, C., MINDEK JR., R. B. Grinding fluid application system design. *Annals of the Cirp*, v. 44, n. 1, 1995.

Artigo recebido em 28/05/2006 e aprovado em 19/11/2008.

www.rem.com.br